

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ВОЗМОЖНЫХ ЗАТОПЛЕНИЙ ПРИ АВАРИЯХ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

¹Симагин И. М., ^{1,2}Полуян Л. В.

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²НИЦ «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, Екатеринбург, Россия

e-mail: simaginivan@icloud.com, ludmila.poluyan@gmail.com

Аннотация. Рассматривается вариант моделирования зон затопления с использованием массива характерных точек и расчет параметров поражающего фактора для области конкретных объектов, приведена методика расчета параметров волны прорыва при авариях на ГТС каскадных водохранилищ и водохранилищ, имеющих ощутимый гидравлический уклон. Представлены общие статистические данные по авариям на гидротехнических сооружениях, сделан акцент на проблемах, связанных с состоянием гидротехнических сооружений на территории РФ. Перечислены основные факторы и сценарии развития аварий на ГТС.

Ключевые слова: аварии, опасные факторы, сценарии, поражающий фактор, волна прорыва, зона затопления.

MODELING OF ZONES OF POSSIBLE FLOODING IN CASE OF ACCIDENTS AT HYDRAULIC STRUCTURES

I. Simagin¹, L. V. Poluyan^{1,2}

¹Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

²S&E Center, Ural Branch, RAS

e-mail: simaginivan@icloud.com, ludmila.poluyan@gmail.com

Abstract. A method of simulating of flooding zones with the use of an array of characteristic points and calculation of the parameters of the damaging factor for the area of specific objects is considered. A technique is given for calculating the parameters of the breakthrough wave in the case of accidents at the hydraulic structures of cascade reservoirs and reservoirs that have a noticeable hydraulic gradient. General statistical data on accidents at hydraulic structures are presented, the emphasis is placed on problems related to the state of hydraulic structures on the territory of the Russian Federation. The main factors and scenarios for the development of accidents on the hydraulic structures are listed.

Key words: hydraulic structures, accidents, damaging factor, striking factor, breakthrough wave, flooding areas.

1. Введение

В ряду стихийных бедствий, особенно в последние годы, наводнения занимают одно из лидирующих мест по числу их повторов, охвату территорий, а также по суммарному среднегодовому экономическому ущербу, который они приносят.

Наиболее эффективным способом борьбы с высокими половодьями и паводками является перераспределение стока водохранилищами, что позволяет на территориях ниже плотин полностью или частично избежать чрезвычайных ситуаций и бедствий, связанных с наводнениями, и значительно снизить затраты на строительство хозяйственных объектов. Спасая обширные территории от наводнений, гидроузлы сами могут стать

источником катастрофических затоплений на территориях нижнего бьефа в случае аварии плотин и образования волны прорыва.

2. Проблемы безопасности гидротехнических сооружений

За прошедший век в мире произошло свыше тысячи аварий крупных ГТС. Анализ аварий ГТС показывает, что основными их причинами являются: разрушение основания и недостаточная пропускная способность водосбросов. С 1902 по 1977 гг. из 300 аварий, произошедших в различных странах, в 35 % случаев причиной было превышение расчетного максимального сбросного расхода, то есть перелив воды через гребень плотины.

В настоящее время в России эксплуатируется более 300 тыс. водохранилищ и несколько сотен накопителей стоков и промышленных отходов. Имеется 60 крупных водохранилищ с объемами более 1 км³. Топливо-энергетический комплекс располагает 350 ГТС, среди них 100 ГЭС с наиболее крупными водохранилищами. Для судоходства используются более 700 водохранилищ, в сельском хозяйстве – более 200 ГТС [1].

Чрезвычайную опасность представляют аварии и разрушения больших плотин и водохранилищ, т.к. с увеличением высоты плотин и объемов водохранилищ повышается степень риска, которому подвергаются население, хозяйственные и природные объекты в нижних бьефах гидроузлов. Также велики, опасность и ущерб для верхних бьефов, связанные с опорожнением водохранилищ.

Угрожает безопасности ГТС, плотин и ГЭС их старение. Согласно данным СИГБ (международной комиссии по большим плотинам) после 40–50 лет срока службы вследствие старения плотин заметно возрастает вероятность их аварий и повреждений. Эта проблема приобрела особую актуальность в связи с введением в 1997 г. в действие Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений»[2].

Проведенный анализ показал, что на сегодняшний момент порядка 100 ГЭС России уже перешли рубеж 50-летней эксплуатации. Они имеют общую установленную мощность более 15 млн. кВт и годовую выработку около 50 млрд. кВт-ч, что составляет треть общего числа ГЭС, более 20 % их мощности и более 25 % общей выработки энергии. Эти обстоятельства требуют особенно тщательной проверки безопасности плотин и принятия необходимых мер.

3. Гидродинамические аварии

Устойчивость и прочность гидротехнического сооружения проектируется на основе максимальных расчетных значений уровня воды водоема, скорости ветра, высоты волны и т.д.

В общем случае опасные факторы, способные инициировать аварии ГТС, рекомендуется подразделять на природные и техногенные, внешние и внутренние опасности.

Для формирования перечня сценариев возможных аварий необходимо выполнить декомпозицию ГТС гидроэлектростанции на элементы, значимые для анализа и оценки риска. Детальность декомпозиции следует определять целями и задачами анализа, оценки и прогнозирования риска аварий конкретного ГТС, а также степенью полноты и достоверности исходных данных о сооружении.

При формировании такого перечня для плотин, перешедших свой рубеж эксплуатации или приближающихся к нему, предлагается проводить дополнительные

топографо-геодезические и инженерно-геологические работы. К ним относятся: бурение разведочных скважин, статическое зондирование, геофизические исследования, электроразведочные работы, сейсморазведочные работы, метод естественного поля и лабораторные исследования грунтов.

Такие действия позволяют составить наиболее точное и детальное заключение о состоянии ГТС и позволяют выделить ослабленные участки на исследованных территориях, где возможные различные неблагоприятные фильтрационные процессы.

После этого следует производить ранжирование аварий, возможных на ГТС, по уровню риска для основных групп реципиентов, выбор и обоснование сценариев наиболее тяжелой и наиболее вероятной аварий ГТС.

При наличии нескольких сценариев, претендующих на роль наиболее тяжелой или наиболее вероятной аварий ГТС, рекомендуется воспользоваться более детальной системой рангов [3].

Сценарии наиболее опасной и наиболее вероятной аварий ГТС служат исходными данными для проведения расчетов волны прорыва и расчета вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС, правила и порядок проведения которого установлены постановлением Правительства РФ от 18.12.2001 №876 [4] и совместным приказом федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации.

Начальной фазой гидродинамической аварии является прорыв плотины, который представляет собой процесс образования прорана и неуправляемого потока воды из верхнего бьефа через проран в нижний бьеф. Во фронте устремляющегося в проран потока воды образуется волна прорыва.

Следовательно, поражающее действие волны прорыва гидродинамической аварии связано с распространением с большой скоростью воды, создающей угрозу возникновения ЧС. Основными параметрами поражающего фактора являются скорость, высота и глубина волны прорыва, температура воды, время существования волны прорыва и время подхода.

Высота волны прорыва и скорость ее распространения зависят от объема и глубины водохранилища, площади зеркала водного бассейна, размеров прорана, разницы уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, гидрологических и топографических условий русла реки и ее поймы. Высота волны прорыва, как правило, находится в пределах 2–12 метров и может достигать 10–30 метров. Скорость распространения волны прорыва составляет 3–25 км/ч, а для горных и предгорных районов – до 100 км/ч [5].

Характер воздействия на объект поражающего фактора определяется гидродинамическим давлением потока воды (гидропоток), высотой, глубиной и скоростью потока воды, уровнем и временем затопления, деформацией речного русла, загрязнением гидросферы, почв, грунтов, размыванием и переносом грунтов.

В зависимости от последствий воздействия потока воды из-за разрушения ГТС на территории возможного затопления выделяют зону катастрофического затопления – часть зоны затопления, в пределах которой распространяется волна прорыва, вызывающая массовые потери людей, разрушения зданий и сооружений, уничтожение других материальных ценностей. На ее внешних границах высота гребня волны прорыва превышает 1 м, а скорость ее движения – более 10 м/с. Время, в течение которого затопленные территории могут находиться под водой, колеблется от 4 часов до нескольких суток. Параметры зоны затопления зависят от размеров водохранилища,

напора воды и других характеристик конкретного гидроузла, а также от гидрологических и топографических особенностей местности [5].

Зона катастрофического затопления определяется заранее на стадии проектирования ГТС. В границах этой зоны выделяют участок возможного (вероятного) чрезвычайно опасного затопления, т.е. территорию, через которую волна прорыва проходит в течение часа после аварии на ГТС. На этой территории возможны наибольшие потери среди населения, сильные разрушения объектов экономики и жилых построек. Параметры волны прорыва на данном участке принимаются: высота гребня волны – более 4 метров, а скорость движения – свыше 2,5 м/с. Для каждого водохранилища (особенно объемом более 50 млн. м³), на котором авария приводит к высоте подъема воды более 1 м, по результатам прогноза разрабатываются атласы или карты затопления и характеристики волны прорыва [6].

4. Методика расчетов параметров поражающего фактора при гидродинамической аварии

Несмотря на отсутствие в РФ утвержденных нормативно–методических документов по оценке риска аварий ГТС, в нашей стране и за рубежом имеется ряд ведомственных методик, позволяющих оценить риск аварии. К ним относятся: методические рекомендации по оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях водного хозяйства и промышленности, разработанные ОАО «НИИ ВОДГЕО», ЗАО «ДАР/ВОДГЕО» [7], методические принципы оценки риска аварийных ситуаций на водохранилищах малого объема авторов Зотеева В.Г., Шахова И.С., Морозова М.Г., Приходько М. [8], а также методика предложенная R. Fell [9], рекомендуемая СТП ВНИИГ 210.02.НТ-04 [10].

Расчет параметров волны прорыва в основном проводится на основе алгоритма ПО «Волна-2» (ВНИИ ГОЧС, 2003) [6]. Использование данного ПО позволяет спрогнозировать последствия прорыва гидроузлов, сопровождающегося образованием волны прорыва. В результате расчетов находятся параметры поражающего фактора гидродинамической аварии – волны прорыва ГТС, зоны затопления и их влияния на устойчивую работу объектов экономики и жизнедеятельности персонала и населения.

По результатам анализа и оценки возможной обстановки органом управления ГОЧС могут быть представлены предложения по профилактике и предупреждению гидродинамической аварии.

Новое дополнение, предлагаемое в данной статье, к существующим алгоритмам, заключается в синтезе и дальнейшем совместном использовании методики по определению параметров волны прорыва и зоны затопления при прорыве (разрушении) плотин водохранилищ и методики по определению параметров волны прорыва и зоны наводнения (затопления) при разрушении ГТС на малых и больших реках.

Особенностью предлагаемого подхода является то, что существующая методика не дает возможности учитывать полный спектр параметров поражающего фактора в рамках расчетов, связанных с их нахождением при разрушениях ГТС на каскадных водохранилищах или на водохранилищах, имеющих ощутимый гидравлический уклон. Предлагаемый способ помогает учитывать более детальные значения параметров поражающего фактора при различных вариантах аварий на ГТС в конкретно заданной области. Также он является приемлемой базовой основой для дальнейшего моделирования зон возможных затоплений.

Для их моделирования предлагается создать массив характерных точек местности в пределах потенциального разлива воды, по возможности сокращенный аналитическим способом, то есть массив, состоящий из точек, выбранных с учетом рациональности их высотных отметок и расположения относительно ГТС.

Таковыми характерными точками могут служить скопления жилых домов, городские районы, территории опасных производственных объектов, объекты транспортной инфраструктуры и другие. Далее для всех заданных точек с использованием предложенного дополнения к существующим алгоритмам работы по предложенной методике рассчитываются параметры волны прорыва.

Полученные результаты служат основой для вычерчивания зон возможных затоплений с помощью карт высотных изолиний. На этом этапе наиболее эффективным способом является поэтапное построение зон, в область которых входят относительные высотные отметки, не превышающие полученные значения высоты волны прорыва (реализация такого подхода возможна с использованием практически любого современного картографического сервиса). Полученные границы зон аппроксимируются и соединяются в единую зону возможного затопления. В дальнейшем эти данные могут быть полезны и практичны при работе с ГИС-сервисами, к примеру с ГИС-ИнГЕО и другими.

Входными данными для расчетов являются:

- объем водохранилища;
- глубина воды перед плотиной (глубина прорана);
- ширина прорана или участка перелива воды через гребень;
- средняя скорость движения волны прорыва (попуска);
- расстояние от плотины (водоёма) до исследуемой точки;
- высота плотины или высота уровня воды в верхнем бьефе плотины (уровень воды в водохранилище);
- параметр прорана в безразмерном виде (l – длина плотины);
- гидравлический уклон;
- удаленность исследуемой точки от ГТС;
- высота месторасположения исследуемой точки.

В результате расчетов определяются параметры волны прорыва (попуска) на заданное расстояние от плотины при ее разрушении:

- время подхода волны прорыва (попуска) на заданное расстояние R (до объекта);
- время опорожнения водохранилища;
- высота волны прорыва;
- скорость прибытия волны прорыва;
- время подхода гребня волны и фронта волны прорыва
- продолжительность затопления территории объекта.

Рассмотрим результаты расчетов по классическому и дополнительному алгоритмам на примере аварии на ГТС Верхне-Макаровского водохранилища. В свое время для Екатеринбурга создали дополнительную систему водоснабжения города за счет ресурса более полноводной реки Уфы. Данная система называется Нязепетровский каскад и представляет собой цепочку из естественных водоемов, трубопроводов и насосных станций. Каскад закачивает воду из Уфы, поднимает ее в условиях существующего

перепада высот на 360 метров и доставляет ее в русло реки Чусовой в окрестностях Екатеринбурга [11].

Наиболее опасным сценарием развития чрезвычайной ситуации на объекте является разрушение плотины при переливе воды через ее гребень, образование прорана и затопление территории нижнего бьефа.

На рис. 1 и рис. 2 соответственно представлены результаты моделирования зон возможных затопления при использовании алгоритма ПО «Волна-2» и предложенного в статье дополнения.

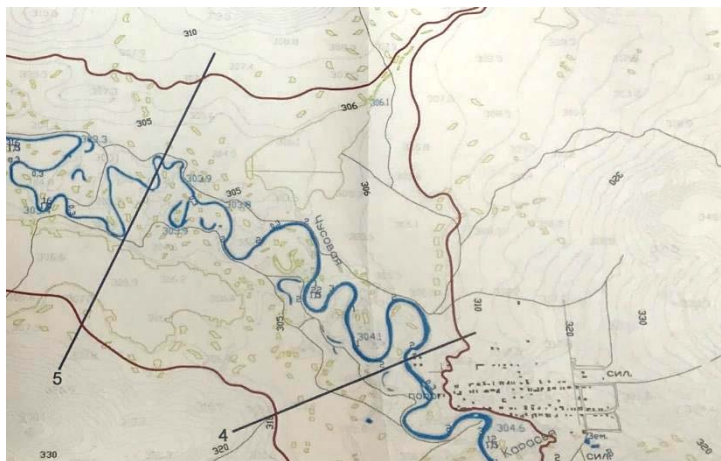


Рис. 1. Результаты моделирования зон возможного затопления с помощью алгоритмов ПО «Волна-2»

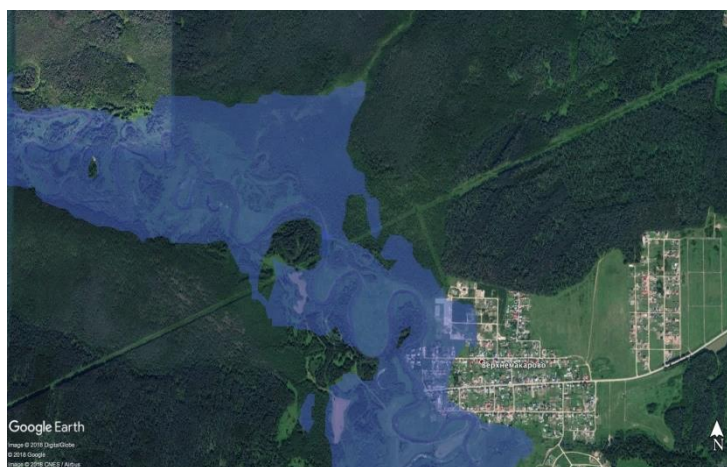


Рис. 2. Результаты моделирования зон возможного затопления с помощью предложенного дополнения к существующим алгоритмам

Разработанный алгоритм наиболее полезен, когда требуется провести оценку и анализа риска конкретного рассматриваемого объекта, попадающего в зону возможного затопления (например, опасного производственного объекта). Его использование позволяет получить детальные параметры поражающего фактора в заданной ограниченной области в экспресс-формате. Могут быть рассчитаны или уточнены такие параметры, как высота волны прорыва, скорость прибытия волны прорыва, время подхода гребня волны прорыва, время подхода фронта волны прорыва и продолжительность затопления. Преимуществом такого подхода является расчет параметров для требуемой конкретной точки (объекта), а не для участка створа, как это реализовано в существующих ПО.

Дополнительно в расчетах возможен учет эквивалента коэффициента шероховатости по створу и аналитический анализ профилей местности по разным направлениям для более точного установления возможности подхода волны прорыва к рассматриваемому объекту.

Полученные результаты могут представлять интерес при оценке территориальных рисков, анализе безопасности и живучести ГТС, составлении паспортов безопасности для территорий муниципальных образований с различной социальной и промышленной инфраструктурой.

Заключение

1. Рассмотрены общие статистические данные по авариям на гидротехнических сооружениях, указаны проблемы, связанные с состоянием гидротехнических сооружений на территории РФ. Перечислены основные факторы и сценарии развития аварий на ГТС.

2. Предложен перечень дополнительных изыскательных работ при формировании перечня сценариев возможных аварий на плотинах перешедших свой рубеж эксплуатации или приближающихся к нему.

3. Предложено дополнение к вычислительным методикам оценки последствий аварий на гидротехнических сооружениях каскадных водохранилищ или на водохранилищах, имеющих ощутимый гидравлический уклон.

4. На примере моделирования зоны возможных затоплений при аварии на ГТС одного из каскадных водохранилищ проиллюстрированы результаты расчетов на основе существующей методики и предложенного к ней дополнения.

Список литературы

1. Ляпичев Ю.П. Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений: учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 222 с.
2. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» (в ред. от 21.07.97 No 117-ФЗ).
3. СТО 70238424.27.140.026-2009. Гидроэлектростанция. Оценка и прогнозирование рисков возникновения аварий гидротехнических сооружений. Нормы и требования. – М., 2009.
4. Постановление Правительства РФ от 18.12.2001 N 876 (ред. от 21.08.2014) «Об утверждении Правил определения величины финансового обеспечения гражданской ответственности за вред, причиненный в результате аварии гидротехнического сооружения».
5. Клуб пожарных и спасателей. Энциклопедия. Гидродинамическая авария [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fireman.club/inseklodepia/gidrodinamicheskaya-avariya/> (дата обращения: 10.08.2018).
6. Методические рекомендации по расчету гидродинамических аварий. ВНИИ ГОЧС, 2003. – 12 с.
7. Куранов Н. П., Розанов Н. Н., Тимофеева Е. А. Методические рекомендации по оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях водного хозяйства и промышленности: ОАО «НИИ ВОДГЕО», ЗАО «ДАР/ВОДГЕО».
8. Зотеев В. Г., Шахов И. С., Морозов М. Г., Приходько М. А. Методические принципы оценки риска аварийных ситуаций на водохранилищах малого объема // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 10. – С. 41–48.
9. R. Fell Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams under Normal Operating Conditions // Repair and Upgrading of Dams: Symposium in Stockholm. – Stockholm, 1996. – P. 567–576.
10. Методические указания по проведению анализа риска аварий ГТС (СТП ВНИИГ 210.02.НТ - 04). ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.
11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bit.ly/2oAlVAG> (дата обращения: 20.10.2018)

12. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33–01–2003: СП 58.13330.2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200094156> (дата обращения: 20.08.2018).
13. Бобков С.Ф. Боярский В.М. и др. Основные факторы учета пропускной способности гидроузлов при декларировании их безопасности // Гидротехническое строительство. – 1999. – № 4. – С. 2–9.
14. Асарин А.Е., Семенов В.М. Расчетные паводки и безопасность плотин // Гидротехническое строительство. – 1992. – № 8. – С. 55–57.
15. Сейсмическая безопасность: исследования, нормы, проектирование/ Я.М. Айзенберг, Р.Т. Агбиев, А.В. Грановский и др. // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 3. – С. 22–25.
16. Стефанишин Д.В. Статистические оценки живучести плотин при авариях. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cawater-info.net/bk/dam-safety/files/stefanishin.pdf> (дата обращения: 25.08.2018)
17. Малик Л.К. Чрезвычайные ситуации, связанные с гидротехническим строительством. Ретроспективный обзор. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cawater-info.net/bk/dam-safety/files/malik1.pdf> (дата обращения: 5.09.2018)
18. David S. Bowles, Loren R. Anderson, and Terry F. Glover. The practice of dam safety risk assessment and management: its roots, its branches, and its fruit. Presented at the Eighteenth USCOLD Annual Meeting and Lecture, Buffalo, New York, August 8-14, 1998.
19. Кулешов Г.Н. Рекомендации по оценке и обеспечению безопасности гидротехнических сооружений. – Т., 2009.
20. Причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС. Выводы Ростехнадзора. Основные тезисы. – М., 2009.